



Implementação de uma solução *mobile mapping* integrando uma câmara de ação e GNSS de precisão

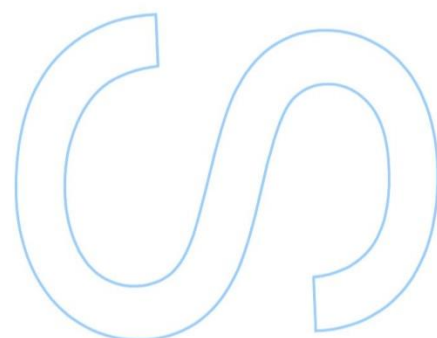
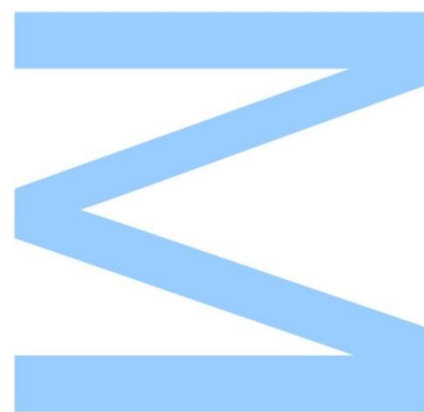
André Pinhal Gonçalves

Mestrado em Engenharia Geográfica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2017

Orientador:

Professor Doutor José Alberto Álvares Pereira Gonçalves,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

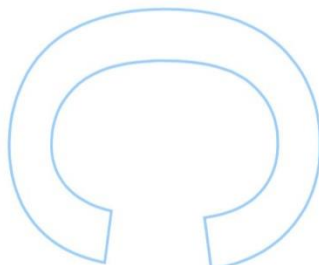
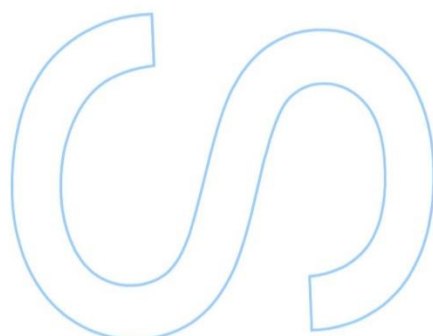
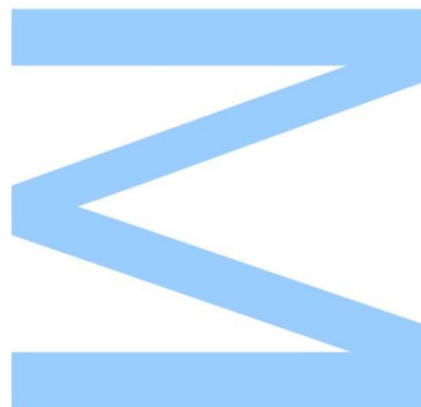




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu mais sincero agradecimento a várias pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação.

Ao Professor José Alberto Álvares Pereira Gonçalves do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e orientador científico desta dissertação, por toda a disponibilidade, interesse e apoio com ideias durante todo o acompanhamento prestado. Agradeço ainda todo o conhecimento científico que com tanta facilidade e entusiasmo consegue transmitir.

À Professora Maria Clara Gomes Quadros Lázaro da Silva do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, pelos momentos enriquecedores durante parte do meu percurso académico. Embora não diretamente contribuiu em muito para as bases que dão suporte ao desenvolvimento deste projeto.

Grande parte do tempo de desenvolvimento desta investigação foi passado no Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros. Assim, quero agradecer ao Engenheiro Américo Magalhães do Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, pela companhia, ajuda e disponibilidade no tratamento de alguma informação imprescindível ao projeto.

Quero igualmente agradecer aos colegas da Eye2Map, pela abertura e prontidão na cedência de um recetor GNSS de vital importância para esta dissertação e ao FIREMAP, pela flexibilidade na disponibilização dos recursos informáticos.

Aos meus pais e em especial ao meu irmão, pela destreza e rapidez na montagem dos componentes de suporte à aquisição de dados. O apoio familiar é muito importante e sem eles este caminho não teria sido possível.

Finalmente, e não por último, à minha amiga Raquel Nogueira, pela longa amizade, pela dedicação e pelo carinho de quem acredita, sem a qual a concretização deste trabalho em palavras ficaria condicionado.

RESUMO

O *mobile mapping* é uma área comercial em franca expansão, que graças às atuais competências da visão computacional, aliadas a técnicas como o Bundle Adjustment, permite criar cartografia com base em informação que há poucos anos nunca se pensaria assim. A partir de uma única câmara de ação e um recetor GNSS de precisão, usando procedimentos desenvolvidos na fotogrametria aérea com *drones*, onde por meio de PPK, fixando as coordenadas dos centros de projeção das imagens se obtêm as orientações das mesmas, implementou-se uma solução capaz de adquirir imagens para restituição fotogramétrica dentro de níveis de precisão decimétricos (*mapping grade*). A dissertação descreve o sistema implementado, os vários aspetos de calibração necessários e os testes de levantamento efetuados. Este trabalho implementa uma solução simples que abre portas a futuros trabalhos académicos e profissionais, quer pela facilidade de utilização, quer pela qualidade da informação de base produzida.

Palavras-chave: Fotogrametria, Mapeamento Móvel, Georreferenciação Direta, Câmara de Ação.

ABSTRACT

The mobile mapping is expanding as a business area, thanks to the latest computer vision algorithms, added to techniques such as the Bundle Adjustment, it allows the production of geographic information in ways, that, a few years ago, it was never thought before. Using only an action camera and a survey grade GNSS receiver, and using the very same principles developed in the PPK aerial photogrammetry solutions for drones, where it is possible to achieve direct georeferencing only from images with well know precise location, the system being developed delivers high accuracy, ready to use, images for photogrammetric restitution, within decimetre accuracy level (mapping grade). The thesis describes the system implementation, the required calibration procedures and results from the experimental tests. The implemented solution, by its simplicity, invites to future academic and professional work, because of its usability and quality of based information produced.

Key words: Photogrammetry, Mobile Mapping, Direct Georeferencing, Action Camera.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
1 Introdução.....	1
1 Introdução	3
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura.....	3
2 Estado da Arte	5
2 Estado da Arte	7
2.1 Primeiras soluções	7
2.2 Soluções comerciais.....	8
2.3 Algoritmos de <i>Image Matching</i> , Visão Computacional e SLAM	10
2.4 Calibração de câmaras.....	11
3 Implementação do Sistema.....	13
3 Implementação do Sistema	15
3.1 Recetor GNSS.....	16
3.1.1 Emlid Reach	16
3.1.2 Trimble R6.....	19
3.2 Câmara: GoPro Hero 5 Black	19
3.3 Calibração dos parâmetros de orientação interna da câmara	21
3.3.1 Estimação da distância focal recorrendo a uma Estadia de Invar ...	21
3.3.2 Estimação da distância focal e restantes parâmetros recorrendo a <i>software</i> da Agisoft	23

3.4	Determinação dos parâmetros de orientação externa da câmara.....	26
3.4.1	Aquisição de dados em campo	26
3.4.2	Processamento dos dados GNSS	28
3.4.3	Deteção dos eventos de sincronização nas fotos	29
3.4.4	<i>Lever Arm</i> e o rumo da câmara	30
3.4.5	Scripts desenvolvidos e resumo do <i>workflow</i>	32
4	Resultados	35
4	Resultados	37
4.1	<i>Frames</i> por segundo da GoPro	37
4.2	Verificação dos rumos calculados.....	38
4.3	Bundle Adjustment com as imagens adquiridas.....	39
5	Conclusão	43
5	Conclusão	45
	Referências Bibliográficas	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema VISAT desenvolvido na Universidade de Calgary, Canada (El-Sheimy, 1996, citado por: Madeira 2007).....	7
Figura 2: Leica Pegasus:Two e Backpack respetivamente (Fonte: página da internet da Leica).....	9
Figura 3: Trimble MX2 e MX7 respetivamente (Fonte: página da internet da Trimble) ..	9
Figura 4: Trimble Indoor Mapping Solution (Fonte: página da internet da applanix)	10
Figura 5: Exemplo de um painel de calibração fotografado de dois ângulos diferentes. Observam-se quatro circunferências em volta dos pontos que devem ser identificados manualmente.....	12
Figura 6: Solução de <i>hardware</i> desenvolvida	15
Figura 7: Emlid Reach (Fonte: página da internet da Emlid)	16
Figura 8: Conexões do <i>Reach</i> (Fonte: Página da internet da Emlid).....	18
Figura 9: Teste posicionamento estático Reach, modo RTK.....	18
Figura 10: Trimble R6 (Fonte: Ficha técnica em pdf da Trimble).....	19
Figura 11: GoPro Hero 5 Black (Fonte: Página da internet da GoPro)	20
Figura 12: Observação da estadia de invar com a GoPro	22
Figura 13: Diagrama com a relação de escala entre a estadia de Invar e o sensor da câmara	22
Figura 14: Leitura de coordenadas com a estação total.....	23
Figura 15: Marcação de pontos de controlo no Agisoft PhotoScan	24
Figura 16: Agosoft Lens, funcionalidade xadrez, a correr num ecrã de 43" 4K	25
Figura 17: À esquerda montagem para o primeiro levantamento e à direita para o segundo.....	27
Figura 18: Trajeto efetuado no 2º levantamento apresentado no Qgis.....	27
Figura 19: Instalação do Trimble R6	28
Figura 20: Processamento com o RTKPOST da RTKLIB alterado pela Emlid, para se obter os eventos (<i>Time Marks</i>)	29
Figura 21: Utilização da lanterna LED para registar um evento de sincronização no vídeo.....	30
Figura 22: Análise do transporte de coordenadas entre o Trimble R6 e a câmara, e o respetivo rumo da câmara	31
Figura 23: Levantamento das coordenadas de apoio à estimação do rumo da câmara	32

Figura 24: Gráfico relacionado o tempo com o número da <i>frame</i>	38
Figura 25: Aplicação <i>web</i> apresentando a <i>frame</i> número 29085	38
Figura 26: Verificação do rumo da <i>frame</i> número 29085 em QGis.....	39
Figura 27: Nuvem de Pontos resultante da densificação do <i>Bundle Adjustment</i> visualizada no CloudCompare	40
Figura 28: Zona escolhida para estudo dos resultados	41
Figura 29: <i>Frame</i> número 23590 do levantamento, tamanho 1080p	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características Emlid Reach	17
Tabela 2: Erros para 4 dos 7 pilares, com uma amostra de mais de 150 épocas por pilar.....	19
Tabela 3: Descrição das rotinas desenvolvidas em <i>python</i>	33

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
CAD	Computer-aided Design
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FPS	Frames por Segundo
GNSS	Global Navigation Satalite System
GPS	Global Position System
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Thinhs
LED	Light Emitting Diode
OAUP	Observatório Astronómico da Universidade do Porto
PPK	Post Processed Kinematic
PSP	Polícia de Segurança Pública
ReNEP	Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS
RTK	Real Time Kinematic
SfM	Structures from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
UHF	Ultra High Frequency

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se visto o tema do *mobile mapping* passar do contexto académico para o comercial, muito influenciado pela revolução nos algoritmos de visão computacional, abrindo portas para soluções com mais peso na componente de *software* do que de *hardware*.

1.1 MOTIVAÇÃO

A ideia que desencadeou este trabalho é despoletada por uma série de perguntas pertinentes: quão simples pode ser uma solução de *mobile mapping* para cartografar, em termos planimétricos, os sinais de trânsito ou os números de polícia? Tirando partido dos últimos desenvolvimentos consolidados na indústria da fotogrametria, é possível correlacionar um trajeto obtido por posicionamento Global Navigation Satellite System (GNSS) com um trajeto obtido por Structures from Motion (SfM)? Descartando o Inertial Measurement Unit (IMU) desta solução e fixando as coordenadas dos centros de projeção, consegue-se obter a correta orientação das imagens?

Estas foram as ideias que lideraram o caminho deste trabalho, até este tomar o seu próprio percurso.

1.2 OBJETIVOS

Acima de tudo, pretende-se desenvolver uma solução acessível, fiável e fácil de operar em campo, com a capacidade de produzir imagens cujos parâmetros de orientação externa permitam, por via fotogramétrica, obter coordenadas dentro do *mapping grade*.

1.3 ESTRUTURA

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 pontos, cujos conteúdos, de uma forma sucinta, são seguidamente descritos.

No ponto 1, é feita uma breve introdução, salientando o motivo e os simples objetivos que se espera cumprir.

No ponto 2, são apresentados os conteúdos resultantes da pesquisa bibliográfica realizada e que constituem o estado da arte deste projeto, descrevendo-se como tem evoluído a abordagem ao *mobile mapping* desde o *hardware* ao *software*, passando pelo *indoor mapping* e também pela realidade virtual.

No ponto 3, o mais extenso, é exposto o trabalho desenvolvido de uma forma cronológica e são também relatadas as abordagens ao problema e alguns trabalhos de suporte a futuros estudos.

No Ponto 4, são apresentadas as análises e as soluções desenvolvidas para verificar as mesmas, assim como alguns achados interessantes durante o desenvolvimento desta dissertação.

No ponto 5, são explanadas as principais conclusões decorrentes deste caso de estudo e experiência, apresentando-se igualmente, algumas propostas e sugestões que se julgam pertinentes para eventuais trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2 ESTADO DA ARTE

2.1 PRIMEIRAS SOLUÇÕES

As primeiras soluções de *mobile mapping* começam a ser desenvolvidas nos anos 80, sendo que já nesta altura se começam a integrar dados posicionais com dados inerciais (Madeira, 2007). A conjugação de todos os equipamentos era complexa e normalmente estavam instalados em carrinhas, Figura 1.

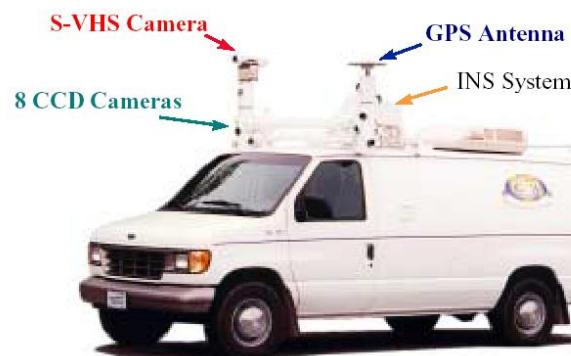


Figura 1: Sistema VISAT desenvolvido na Universidade de Calgary, Canada (El-Sheimy, 1996, citado por: Madeira 2007)

Um sistema deste tipo, recolhendo informação de pelo menos três tipos de sensores (câmaras, posicionamento GNSS e orientação do sistema inercial IMU) requer uma sincronização temporal rigorosa, exigindo comunicação eletrónica que garanta essa sincronização. A esses sistemas poderão ser acrescentados outros, como o odómetro, que mede o espaço percorrido pela viatura e a velocidade instantânea.

Relativamente aos sistemas comerciais atuais, a diferença está no tamanho, nas precisões e na facilidade de operação. No entanto, a complexidade do sistema mantém-se, embora, no presente, isso possa ser invisível para o utilizador final.

Estes sistemas utilizam as imagens adquiridas para, através de processamento fotogramétrico, determinar as posições de objetos observáveis nas imagens. A precisão dos sensores de medição de posição e de atitude permitem efetuar uma georreferenciação direta, isto é, determinar a posição e a orientação de um sistema de referência fixo na viatura, sendo depois transposta para as câmaras envolvidas. Dado que são conhecidos os parâmetros de orientação externos de cada imagem, facilmente podem ser determinadas coordenadas de objetos através da interseção dos

feixes estabelecidos para pontos conjugados. No caso da existência de apenas uma câmara, esse procedimento poderá ser feito sobre imagens consecutivas, obtidas com o movimento da viatura. Para além das coordenadas dos pontos observados, que poderão constituir bases de dados geográficas de mobiliário urbano, recolhe-se toda a informação semântica interpretável das imagens, a própria imagem como atributo multimédia.

Na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) foi desenvolvido um sistema deste tipo (Madeira, 2007), baseado em duas câmaras de vídeo industriais. Esse trabalho teve por base um sistema de georreferenciação direta existente no Observatório Astronómico da Universidade do Porto (OAUP), constituído pela associação de um recetor GNSS de dupla frequência com uma unidade de medição inercial (IMU), desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação anterior (Bastos *et al.*, 1999). (Madeira, 2007) desenvolveu um sistema modular de aquisição de imagens compatibilizado com o sistema de georreferenciação direta, de forma a poder obter informação georreferenciada de objetos identificáveis nas imagens. No presente trabalho, constituiu-se um assim um sistema móvel de levantamento de custo moderado, mas que pudesse também explorar sistemas de georreferenciação direta de baixo custo, a desenvolver a desenvolver também.

2.2 SOLUÇÕES COMERCIAIS

Os vários fabricantes de equipamento na área da recolha de informação geoespacial têm apresentado novos produtos nos últimos anos. Entre eles estão as empresas Leica Geosystems e a Trimble, de onde se descrevem as soluções mais recentes. De forma alguma esta lista é exaustiva, pretendendo ser apenas exemplificativa de alguns tipos de soluções recentes, que se caracterizam por pequenas dimensões, mas que, dados os elevados padrões dos equipamentos incluídos, têm custos altos.

Leica Geosystems

A Leica apresentou recentemente duas soluções de mapeamento móvel baseadas em equipamento muito compacto: o Pegasus:Two e o Backpack. Ambos oferecem conjugação de imagem e varrimento laser (Figura 2), distinguindo-se pelo facto de o primeiro ser operado, como tradicionalmente numa viatura, sendo o outro transportado por um operador numa mochila. Neste caso, as possibilidades de aquisição de dados

são bastante diferentes, podendo ser percorridas ruas e caminhos em ambiente urbano ou rural, onde não possam circular viaturas.



Figura 2: Leica Pegasus:Two e Backpack respetivamente (Fonte: página da internet da Leica)

Na página da Leica são também apresentados outros sensores como um radar de penetração no solo, uma câmara de pavimento, um medidor da qualidade do ar, que complementam os dados obtidos pelo Leica Pegasus:Two. A função deste equipamento equipara-se ao Trimble MX2 e MX7 (Figura 3), descritos a seguir. A versão mochila traz uma vertente mais portátil e móvel a este tipo de aquisição de dados.

Trimble

A Trimble apresenta duas soluções (Figura 3), uma baseada em varrimento laser móvel, o Trimble MX2, e outra em imagem, o Trimble MX7. As duas podem ser transportadas num veículo motorizado (carro), incorporam soluções de georreferenciação direta e têm a possibilidade de serem ligadas ao odómetro do carro. Assim como as soluções da Leica, estes dois equipamentos também são muito compactos.



Figura 3: Trimble MX2 e MX7 respetivamente (Fonte: página da internet da Trimble)

Recentemente tem havido procura de sistemas de mapeamento *indoor*, pelo que os fabricantes apresentam soluções para essas situações, mas naturalmente recorrendo a métodos de posicionamento diferentes. Contudo, utilizam igualmente sensores de varrimento lasers e/ou câmaras. A Figura 4 mostra o Trimble Indoor Mapping Solution, que integra imagem e varrimento laser, e que é impulsionado por uma pessoa. Não possui recetor GNSS e precisa de dois pontos de referência nos extremos do edifício ou área *indoor* a cartografar.



Figura 4: Trimble Indoor Mapping Solution (Fonte: página da internet da applanix)

Os sistemas referidos classificam-se no nível *survey grade*, que consiste em precisões posicionais centimétricas, associadas ao levantamento topográfico de precisão. O nível *mapping grade* caracteriza-se por precisões dentro do decímetro até ao metro.

Naturalmente que estes sistemas respondem a trabalhos de grande exigência, mas traduzem-se em custos de aquisição muito elevados (centenas de milhares de euros). O sistema desenvolvido nesta dissertação pretende situar-se numa gama muito inferior em termos de custos, mas aproximando-se tanto quanto possível do *survey grade*.

2.3 ALGORITMOS DE IMAGE MACHING, VISÃO COMPUTACIONAL E SLAM

As áreas da visão computacional e da robótica têm tido grande desenvolvimento na última década. Uma vez que fazem uso da imagem, e muitas vezes com necessidades de extração de informação geométrica e de efetuar navegação, vieram convergir com os desenvolvimentos que estavam a ocorrer na fotogrametria. Algumas áreas de

processamento de dados fotogramétricos, por exemplo os adquiridos com *drones*, tiveram assim grande desenvolvimento. Listam-se a seguir algumas siglas, dando uma breve explicação:

SIFT – Scale Invariant Feature Transform (Lowe, 2004): trata-se de um algoritmo que permite encontrar pontos comuns entre imagens. Outros algoritmos do mesmo tipo são referidos na literatura, com siglas como o SURF (Bay *et al.*, 2008), ou o ORB (Rublee *et al.*, 2011).

SfM – Structure from Motion: algoritmo de orientação de imagens baseado na interseção de feixes de um objeto observado em diferentes imagens obtidas em movimento (do objeto ou da câmara). Na verdade, acaba por não ser particularmente diferente dos algoritmos de *bundle adjustment* envolvidos na triangulação aérea ou na fotogrametria terrestre com imagens convergentes. Diferencia-se por se basear num elevado número de pontos de ligação obtidos com algoritmos como o SIFT.

SLAM – Simultaneous Location and Mapping: algoritmos, como o ORB-SLAM2 (Mur-Artal *et al.*, 2017) baseado no ORB, desenvolvidos para a navegação de *robots*, em que através da orientação relativa em sequências de imagens são determinadas as variações de posição, bem como as matrizes de rotação entre imagens sucessivas. Trata-se de um método integrador, que acumulará erro ao longo de muito tempo de movimento. O conhecimento de algumas posições ao longo da trajetória, assim como o ajuste da posição e orientação das imagens obtidas em tempo real, através do reconhecimento das mesmas numa biblioteca de imagens previamente existente do local, como as disponibilizadas pelo Mapillary¹ (Neuhof *et al.*, 2017), permite melhorar a georreferenciação global da trajetória obtida.

2.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

A fotogrametria aérea tradicional é feita com câmaras métricas com lentes de grande rigor geométrico, possuindo distorções muito pequenas e que, por isso, geram imagens praticamente correspondentes a uma projeção central perfeita. Mesmo assim, são normalmente calibradas em laboratório, individualmente, sendo originado um relatório de calibração com parâmetros para cada câmara. O modelo geométrico considerado normalmente é o de Brown (Brown, 1972).

¹ Mapillary - *Street-level imagery for the future of maps* (<https://www.mapillary.com/>)

No caso da fotogrametria terrestre, era mais frequente usarem-se câmaras não métricas, sendo para isso necessário executar procedimentos de calibração da câmara. Isso era feito, por exemplo, no programa Photomodeler, através de fotografias de um painel com padrões de dimensão conhecida. Um exemplo de outro *software* de calibração é o "Calib", uma *Tollbox* em Matlab (Madeira, 2007). É utilizado um conjunto de imagens de uma painel com quadrados pretos e brancos (em xadrez) de 10 cm de lado, no qual o operador identifica 4 pontos por imagem (Figura 5). Com base nesses pontos são pesquisados todos os vértices dos quadrados nas diferentes imagens. É executado um ajuste de feixes tomando como incógnitas vários parâmetros de calibração.

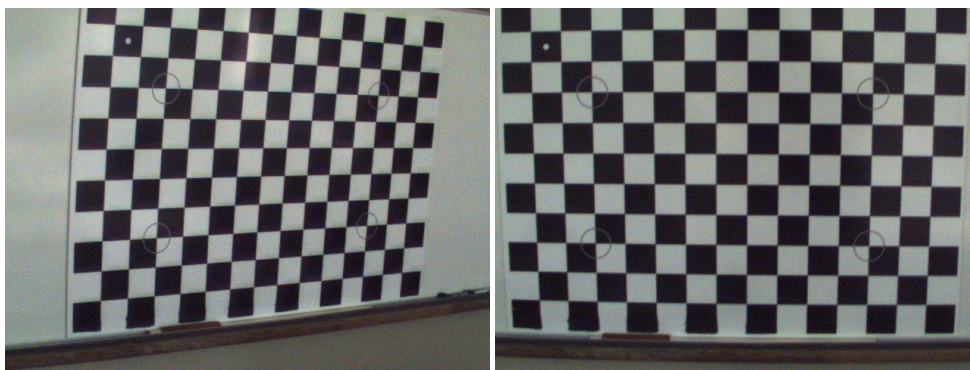


Figura 5: Exemplo de um painel de calibração fotografado de dois ângulos diferentes. Observam-se quatro circunferências em volta dos pontos que devem ser identificados manualmente

No caso das câmaras de ação, é normalmente reconhecido que são câmaras com grandes distorções. Dado o interesse que algumas câmaras de ação passaram a ter, especialmente para uso em *drones*, existem alguns estudos de calibração. É de salientar o de (Balletti *et al.*, 2014), em que é estudada a calibração de câmaras da marca GoPro.

3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

O trabalho desenvolvido culminou numa solução, apresentada na Figura 6, para aquisição de imagens terrestres sincronizadas com o tempo e a posição Global Position System (GPS), muito fácil de operar no campo. Os intervenientes na solução são, o recetor GNSS e a câmara de vídeo, e são operados independentemente, com a possibilidade de usar qualquer câmara. A precisão da sincronização depende primordialmente da taxa de *frames* por segundo da gravação do vídeo.



Figura 6: Solução de *hardware* desenvolvida

A juntar à solução, existe uma bateria de 5 volts, que alimenta o recetor GNSS e uma lanterna Light Emitting Diode (LED), que está ligada ao recetor e possibilita a ligação por via de um *flash* luminoso que fica registado na imagem da câmara, entre o recetor e a câmara. O princípio de funcionamento e sincronização assenta no facto de que, cada *flash* luminoso visto durante a filmagem vai ficar registado também no recetor.

O restante trabalho prendeu-se com o tratamento da informação recolhida, a fim de se conseguir obter imagens onde as coordenadas dos centros de projeção são bem conhecidas.

O sistema desenvolvido integra uma câmara que dispõe de um recetor GNSS, mas por se tratar de um recetor de códigos, não proporciona o rigor posicional necessário para a solução de *mobile mapping* que se pretendia próxima do nível de precisão designado como *survey grade*. Como tal, foi necessário incorporar um recetor GNSS externo e sincronizá-lo com a câmara. Para algumas aplicações menos exigentes em termos de rigor posicional, o posicionamento da própria câmara poderia ser suficiente. Na forma como o sistema foi desenvolvido, ele poderá incorporar uma câmara de ação

sem GPS. Seguidamente descrevem-se as várias componentes do sistema, bem como os detalhes relativos à sua implementação e calibração.

3.1 RECETOR GNSS

3.1.1 EMLID REACH

O recetor planeado para o sistema é o Emlid Reach, apresentado na Figura 7. Trata-se de um pequeno recetor GNSS, de frequência única, baseado na plataforma Intel Edison, e que tira todo o partido do módulo NEO-M8T da u-blox, um verdadeiro dispositivo Internet of Things (IoT).



Figura 7: Emlid Reach (Fonte: página da internet da Emlid)

Na verdade, é mais do que um simples recetor GNSS, porque tem um IMU e permite ao utilizador fazer desenvolvimento sobre a plataforma Intel Edison que corre em Linux. Na Tabela 1 são apresentadas algumas das características deste recetor:

Tabela 1: Características Emlid Reach

Dimensão	Tamanho	45,5 x 27 x 9,2 mm
	Peso	14 g
	Temperatura de Operação	-20...+65°C
Alimentação Elétrica	Voltagem de Funcionamento	4.75 - 5.5 V
	Corrente média a 5 volts	200 mA
GNSS	Amazenameonto	2 GB
	Correções Diferenciais	RTCM2, RTCM3
	Raw	RINEX2.X, RINEX3.X
	Constelações	GPS/QZSS L1, GLONASS G1, BeiDou B1, Galileo E1, SBAS
	Canais	72
	IMU	9DOF
	Taxa de atualização	14 Hz / 5 Hz
Conectividade	Wireless	Wi-Fi (802.11a/b/g/n), Bluetooth (4.0/2.1 EDR)
	Interfaces	USB, UART, Event
Precisão do Posicionamento	Estático	H: 5mm + 1ppm, V: 10mm + 2ppm
	Cinemático	H:7mm + 1ppm, V: 14mm + 2ppm

Todo o aparelho é operado através de uma *interface web*, que confere uma simplicidade e compatibilidade multiplataforma extraordinárias. Isto significa, por exemplo, que o recetor pode ser totalmente operado a partir de um *smartphone*, dando ao conjunto uma facilidade de manuseamento e operabilidade muito grande.

Uma das funcionalidades disponíveis confere a um *drone* equipado com o Reach competências Post Processed Kinematic (PPK), sendo este recetor GNSS também compatível com soluções Real Time Kinematic (RTK). A solução PPK contempla o registo do tempo e posição dos disparos de uma câmara fotográfica com muita precisão. A Figura 8 apresenta a disposição das conexões de acesso a funcionalidades do recetor, de salientar o Time Mark. Esta é a funcionalidade explorada nesta dissertação, que nos permite ligar a câmara de ação ao recetor GNSS.

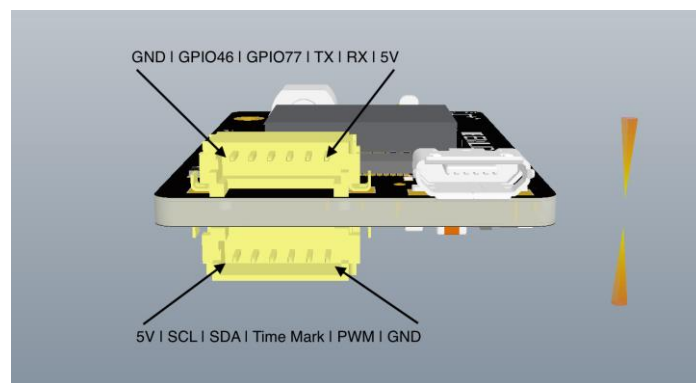


Figura 8: Conexões do *Reach* (Fonte: Página da internet da Emlid)

No sentido de aferir o rigor posicional alcançado pelo recetor, fez-se um pequeno teste de posicionamento em modo RTK² com o Reach sobre um alinhamento de pilares Norte-Sul no Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, com a representação de parte dos resultados na Figura 9.

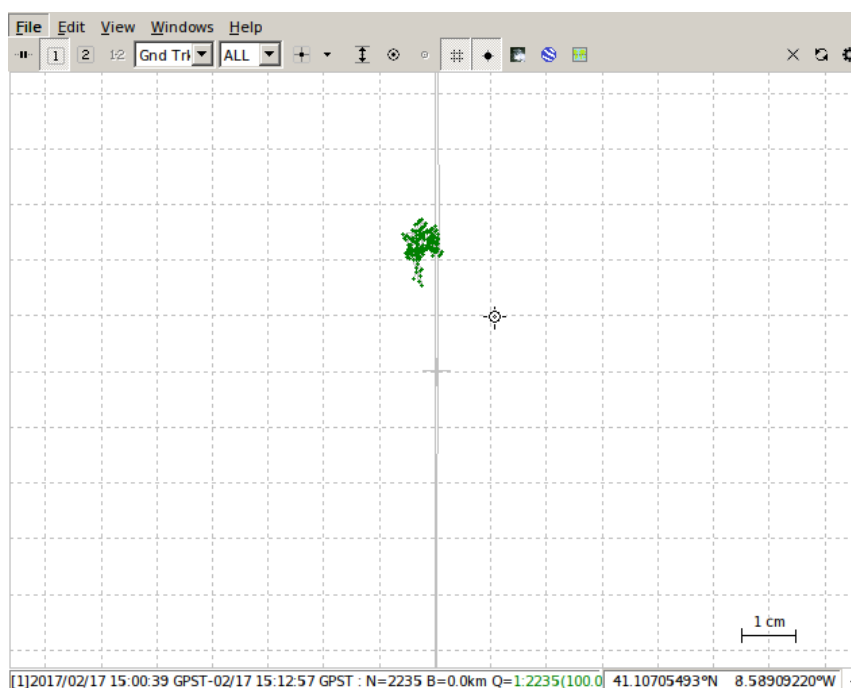


Figura 9: Teste posicionamento estático Reach, modo RTK

O teste foi conduzido nas melhores condições possíveis ao longo de 7 pilares e apresentou resultados similares em todos, com uma precisão dentro de 3 milímetros e uma exatidão dentro dos 3 centímetros, conforme a Tabela 2.

² Com a estação de referência a menos de 100 metros

Tabela 2: Erros para 4 dos 7 pilares, com uma amostra de mais de 150 épocas por pilar

Pilar	Desvio Padrão (m)	Erro Médio Quadrático (m)
1	0.003	0.033
2	0.002	0.019
3	0.013	0.019
4	0.002	0.016

3.1.2 TRIMBLE R6

O Trimble R6 entra no sistema para dar redundância à solução e averiguar as precisões do Reach. No entanto, no desenrolar do trabalho revelou-se um elemento fundamental. Este é um recetor GNSS de *survey grade* e quando operado em modo RTK oferece soluções dentro dos 3 centímetros na maioria das condições. A Figura 10 mostra um recetor Trimble R6 montado sobre um bastão. O equipamento disponível na FCUP apresenta uma diferença em relação ao da figura, já que faz o processamento RTK através de uma ligação de dados, com o protocolo NTRIP, e não por uma comunicação rádio Ultra High Frequency (UHF).



Figura 10: Trimble R6 (Fonte: Ficha técnica em pdf da Trimble)

3.2 CÂMARA: GOPRO HERO 5 BLACK

A GoPro Hero 5 Black, representada na Figura 11, é uma câmara de ação de referência no mercado, com utilizadores desde um público amador a um público profissional. Esta possui um recetor GNSS de códigos, não utilizado neste trabalho, e

com capacidade de fazer vídeo 4K³ a 30 *Frames Por Segundo* (FPS). Possui outras resoluções inferiores, que permitem maior número de FPS.

Para o desenvolvimento deste estudo foi usada no modo de vídeo linear com a resolução 1080p⁴ a 60 FPS, embora tenha capacidade para fazer 120 FPS nesta resolução.



Figura 11: GoPro Hero 5 Black (Fonte: Página da internet da GoPro)

O modo de imagem designado como linear possui uma correção da distorção habitual das câmaras de ação, o efeito de “barril”. No essencial, é aplicada uma correção da distorção radial, o que se manifesta pelo facto de que linhas retas no espaço objeto surgem como linhas retas na imagem. Este facto, apesar de corrigir o essencial da deformação para a visão humana, não dá garantia de que não se mantenham deformações residuais e, por isso, continua a precisar de calibração para uma exploração fotogramétrica das imagens.

A exploração fotogramétrica do vídeo requer que sejam extraídas as *frames*, de forma a que possam ser tratadas como imagens individuais, às quais é aplicado o modelo matemático das equações de colinearidade. Dado que o vídeo não fornece informação aproximada suficiente sobre a distância focal e o tamanho do pixel no sensor, foi feita uma calibração inicial que a seguir se descreve.

³ Ultra High Definition, resolução de 3840 x 2160

⁴ Full HD, resolução de 1920 x 1080

3.3 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERNA DA CÂMARA

Entende-se por parâmetros de orientação interna da câmara as características óticas, incluindo as distorções da lente, isto é, as componentes lineares e não lineares. Para este trabalho considerou-se a distância focal, o ponto principal, a distorção radial e a possível relação não ortogonal do pixel no sensor.

A importância de fixar os parâmetros de calibração da câmara é justificada pelo modo como a solução de Bundle Block Adjustment opera. Também denominado atualmente por Bundle Adjustment, é originário dos algoritmos desenvolvidos com a Triangulação Aérea da fotogrametria tradicional. Esta técnica, auxiliada por algoritmos de *image matching*, pressupõe a utilização do Método dos Mínimos Quadrados para estimar a localização dos pontos a Três Dimensões⁵ (3D), e os parâmetros externos⁶ da câmara, incluindo os parâmetros de calibração interna, respeitando as equações e colinearidade e a geometria interna da câmara.

Ao fixar os parâmetros de câmara, estamos a reduzir tanto o número de incógnitas como a ambiguidade da solução.

3.3.1 ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA FOCAL RECORRENDO A UMA ESTADIA DE INVAR

Decidiu-se dar uma nova utilização a este instrumento da topografia clássica para estimar a distância focal. Uma estadia de invar é uma barra metálica com 2 alvos nos extremos, unidos por um fio de invar, e define 2 metros com muita precisão. O invar é uma liga metálica com muito baixo coeficiente de dilatação térmica, que foi nomeado assim em alusão à invariabilidade do mesmo.

⁵ Num sistema de referência arbitrário

⁶ Posição e orientação



Figura 12: Observação da estadia de invar com a GoPro

A experiência foi levada a cabo sobre um alinhamento de pilares, Figura 12, no Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, cujas distâncias estão bem definidas. O princípio usado, descrito na Figura 13, assenta na relação aerofotogramétrica entre a altura de voo e a distância focal, neste caso aplicado aos pilares e à estadia de invar.

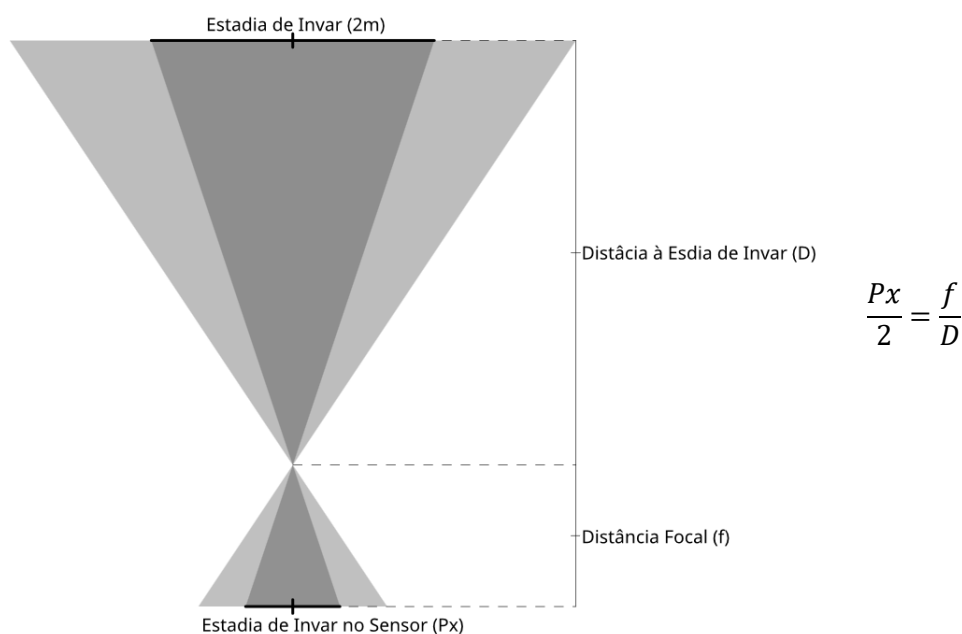


Figura 13: Diagrama com a relação de escala entre a estadia de Invar e o sensor da câmara

Onde, P_x é o número de pixéis que a estadia de invar ocupa na foto, D é a distância entre a câmara fotográfica e a estadia de invar e f é a distância focal, calculada em pixéis. Uma vez que não temos a certeza do tamanho real do sensor para o tipo de imagem com que estamos a trabalhar, é conceptualmente tão correto como trabalhar em metros. Para as distâncias analisadas o efeito da distorção radial não é significativo, tendo em conta que existem correlações entre os parâmetros de calibração de uma imagem.

3.3.2 ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA FOCAL E RESTANTES PARÂMETROS RECORRENDO A SOFTWARE DA AGISOFT

Recorreu-se a uma estação total para obter as coordenadas de vários pontos, em forma de grelha regular, ao longo de uma superfície relativamente plana, tendo-se, para tal escolhido uma parede no Teatro Municipal Campo Alegre, no Porto, Figura 14.

As medidas foram tratadas de forma a minimizar a variação altimétrica, esquecendo o facto de serem leituras numa parede vertical, de forma a definir um plano horizontal num sistema de coordenadas cartesianas arbitrário.



Figura 14: Leitura de coordenadas com a estação total

Finda esta parte, precedeu-se à recolha de algumas imagens e vídeos para tratamento dos mesmos com o *software* PhotoScan, Figura 15, com o objetivo de estimar os parâmetros de orientação interna da câmara.

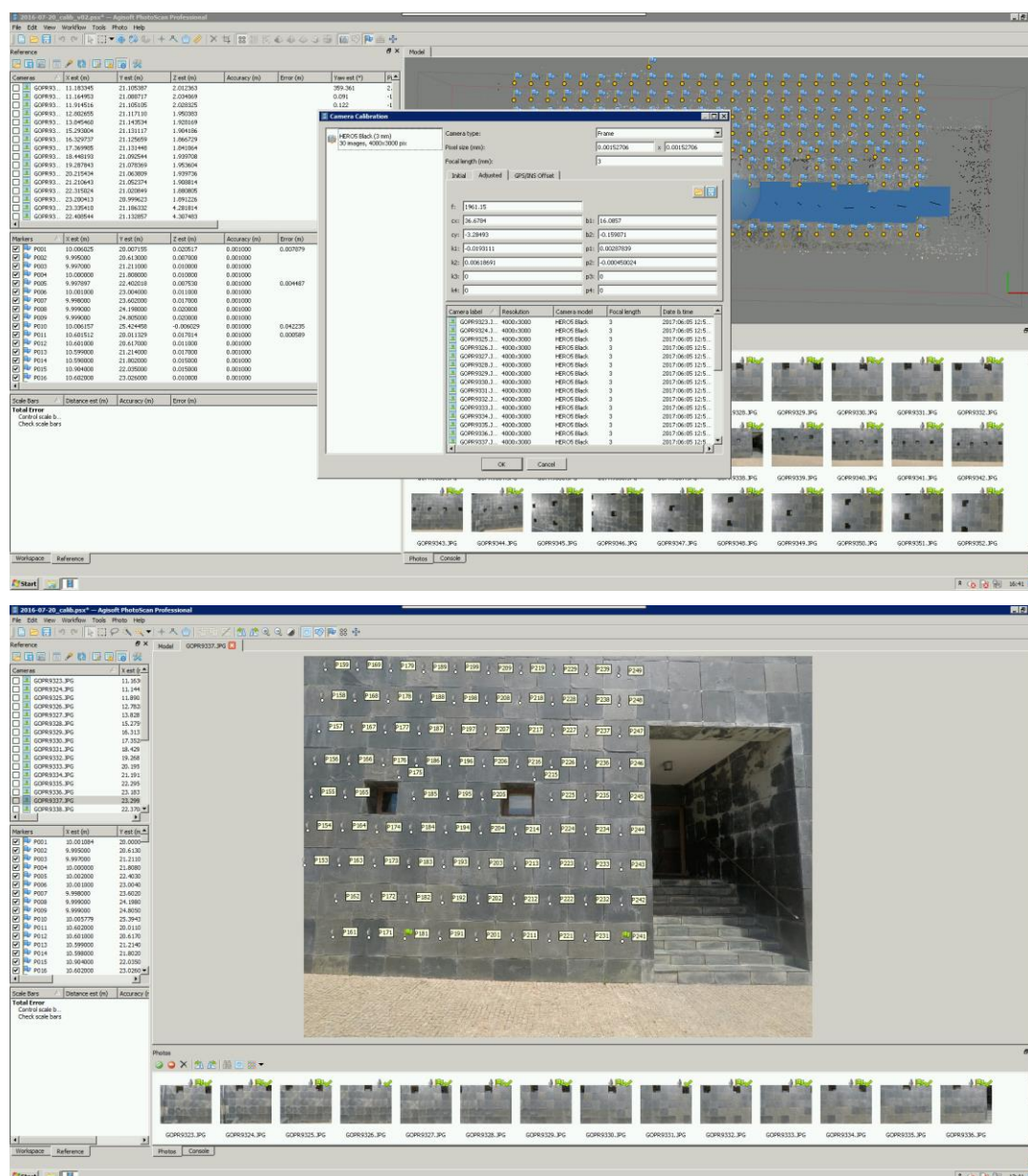


Figura 15: Marcação de pontos de controlo no Agisoft PhotoScan

Foi um trabalho moroso, tanto na aquisição das leituras com a estação total como na marcação dos pontos de controlo nas imagens. Contudo, este revelou-se infrutífero, uma vez que as imagens de vídeo foram gravadas com o estabilizador digital ligado, opção ativada por definição e nova funcionalidade nas GoPro Hero 5 Black, e sendo as imagens do vídeo as importantes para este trabalho. De certa forma, a curiosidade aqui consistia em ver a relação entre o modo foto, resolução 4000x3000 pixéis, e o modo vídeo linear, resolução 1080p a 60 FPS. Porém, já nos apercebemos do problema tarde e não justificava repetir o processo para as imagens sem estabilizador, uma vez que o foco do trabalho não era este.

A estabilização digital de imagem não é amiga da fotogrametria, assim como o efeito *rolling shutter*. Contudo, pelo menos os 250 pontos de controlo levantados com a estação total poderão servir para futuras calibrações.

Decidiu-se dar uma oportunidade ao *software* Lens da Agisoft. Este *software* permite, recorrendo a apenas um ecrã, Figura 16, obter os parâmetros de calibração da câmara e da lente em uso.



Figura 16: Agisoft Lens, funcionalidade xadrez, a correr num ecrã de 43" 4K

O resultado da calibração pareceu coerente com o valor da distância focal obtido com a estadia de invar. Assim, esta parte foi dada por concluída, ficando o tempo em exclusivo para o estudo dos parâmetros externos da câmara, nomeadamente as coordenadas dos centros de projeção de cada imagem.

A calibração dos parâmetros de orientação internos de uma câmara recorrendo a um ecrã é uma solução prática, mas pode apresentar alguns condicionalismos a uma solução precisa. Tipicamente, o ecrã tem menos pixéis do que o sensor da câmara, quando é espectável o oposto, ou a matriz digital do ecrã pode ser defeituosa. O importante para uma calibração sólida baseia-se no facto de os pontos de controlo terem maior resolução do que a resolução da imagem.

Obter estes parâmetros com rigor é vital para o processo de georreferenciação direta e para a solução de mobile mapping em desenvolvimento.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERNA DA CÂMARA

Os parâmetros de orientação externos da câmara são dados pela posição e pela orientação de cada imagem adquirida, totalizando 6 parâmetros: X , Y , Z , ω , ϕ , κ , ou, M , P , H , ω , ϕ , κ .

Seguindo a lógica de reduzir a ambiguidade para a solução do *Bundle Adjustment*, pretende-se, com os procedimentos de seguida descritos, fixar as posições da câmara. Com isto deseja-se perceber se a solução de georreferenciação direta está dentro do *mapping grade*, uma vez que não são usados nenhuns GCP para restringir as posições dos pontos 3D. Com estes procedimentos, deixamos apenas total liberdade para a estimação das orientações da câmara e das posições dos pontos 3D. No caso de se estar a trabalhar também com um IMU, os cálculos estariam maioritariamente focados na geração da nuvem de pontos 3D. No entanto, traria muito mais complexidade à solução do sistema, contrariando os pressupostos deste trabalho.

3.4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

A zona escolhida situa-se em Vila Nova de Gaia, perto da Polícia de Segurança Pública (PSP) de Canidelo, e é um local com pouco movimento e com fácil visibilidade do céu para o recetor GNSS. Houve uma primeira recolha de dados numa fase muito preliminar, noutro local, mas a câmara estava em modo *wide*, resolução 4K a 30 FPS. Tomou-se então a decisão de que o ideal seria usar o modo linear, onde o efeito da distorção radial está já reduzido, portanto, gravação com a resolução 1080p a 60 FPS. Foi sobre esse modo que os estudos dos parâmetros de orientação interna da câmara foram desenvolvidos.

Desta vez, a montagem da câmara e do recetor GNSS foi feita sobre o retrovisor direito do carro no sentido do movimento, ao contrário do levantamento preliminar, que foi sobre o tejadilho, Figura 17.



Figura 17: À esquerda montagem para o primeiro levantamento e à direita para o segundo

Durante a recolha dos dados a viatura deslocou-se dentro dos 30 km/h, percorrendo cerca de 3,5 km, onde houve redundância de passagem nalgumas ruas (Figura 18).

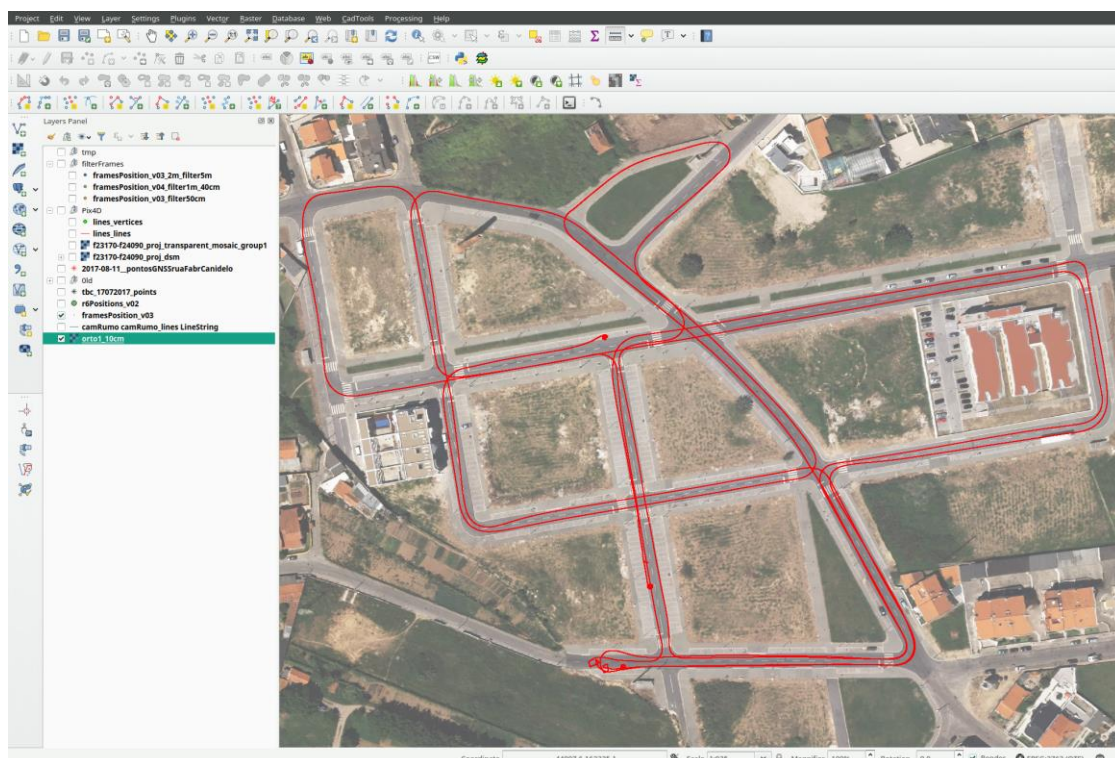


Figura 18: Trajeto efetuado no 2º levantamento apresentado no Qgis

Por uma questão de redundância e verificação das precisões em geral, o trajeto foi registado também num recetor GNSS Trimble R6, instalado de interior da viatura (Figura 19). No entanto, a qualidade dos dados para o propósito não foi condicionada.



Figura 19: Instalação do Trimble R6

3.4.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS GNSS

Durante o levantamento, os dois recetores gravaram as observações em bruto, mas também funcionaram em modo RTK, ligados à Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP), nomeadamente à estação de referência em São João da Madeira (EDVD), a cerca de 30 km, uma vez que a estação de referência em Vila Nova de Gaia estava inoperacional.

Assim que a viatura iniciou o movimento, o Reach perdeu logo a fixação das ambiguidades, permanecendo em modo flutuante durante todo o posicionamento cinemático. Estes resultados não melhoraram com o processamento em gabinete, onde para tal foi usado o RTKLIB, um *software open source* de posicionamento GNSS de precisão.

Do RTKPOST, Figura 20, resultam dois ficheiros, nomeadamente o posicionamento normal à cadência configurada no recetor e o posicionamento no momento dos *flashes* luminosos, sendo o campo mais importante aqui o tempo. Importa aqui salientar que, por experiência, os tempos resultantes do processamento com diferentes bases se mantêm constates. Portanto, embora a precisão espacial esteja condicionada, a

precisão do tempo no momento dos *flashes* não, sendo estes tempos dados com uma precisão bastante superior a 1 milissegundo⁷.

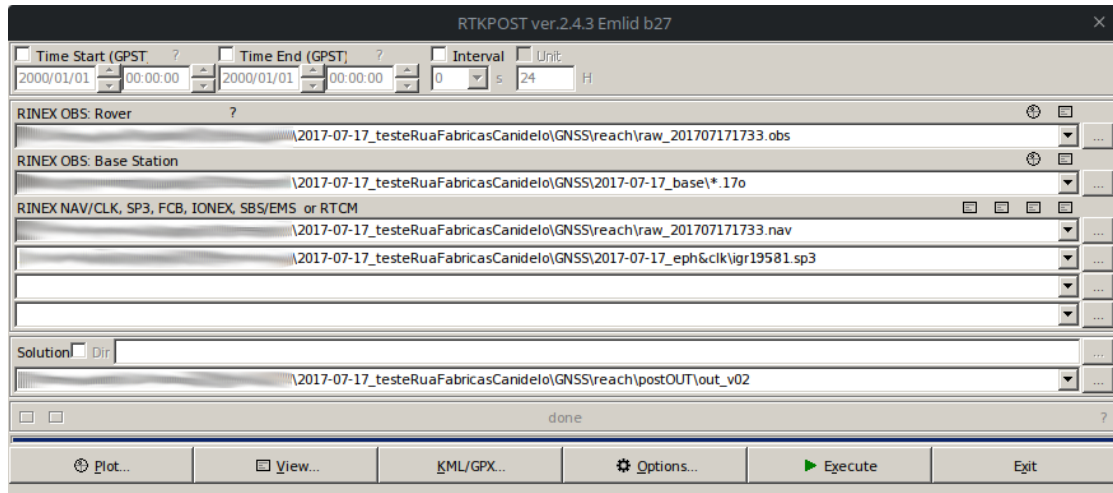


Figura 20: Processamento com o RTKPOST da RTKLIB alterado pela Emlid, para se obter os eventos (*Time Marks*)

Por uma questão de comodidade, os dados do Trimble R6 foram também tratados em gabinete, no *Trimble Business Center*. Resultando num posicionamento dado ao segundo, usando uma cadência maior, como os 10Hz configurados no Reach, teriam contribuído para uma descrição mais fiel do movimento, nomeadamente em situações de curva. Uma vez que as posições do Reach, devido à solução flutuante, apresentavam um rigor desadequado para o sistema, decidiu-se optar pelos dados do Trimble R6.

3.4.3 DETEÇÃO DOS EVENTOS DE SINCRONIZAÇÃO NAS FOTOS

Todas as *frames* do vídeo foram extraídas e foram identificados os tempos⁸ dos *flashes* nas fotos, registando o número da *frame* e o tempo associados. Cada *flash* é acionado por um interruptor e num vídeo de 60 FPS ocupa cerca 10 *frames*, sendo que o importante é analisar a primeira *frame* que está contaminada pela luz do *flash*. Devido ao efeito *rolling shutter*, que pode ser observado na imagem do lado direito da Figura 21, muitas vezes a *frame* associada ao evento de sincronização pode não ter a lanterna ligada. No entanto, observa-se que no sentido do varrimento do sensor há

⁷ Anunciado no fórum da Emlid e descrito na documentação da u-blox

⁸ Tempo GPS

partes que já estão contaminadas pela luz do *flash*. Portanto, quanto maior for o *frame rate*, maior será a precisão com que vamos posicionar as *frames* no tempo.

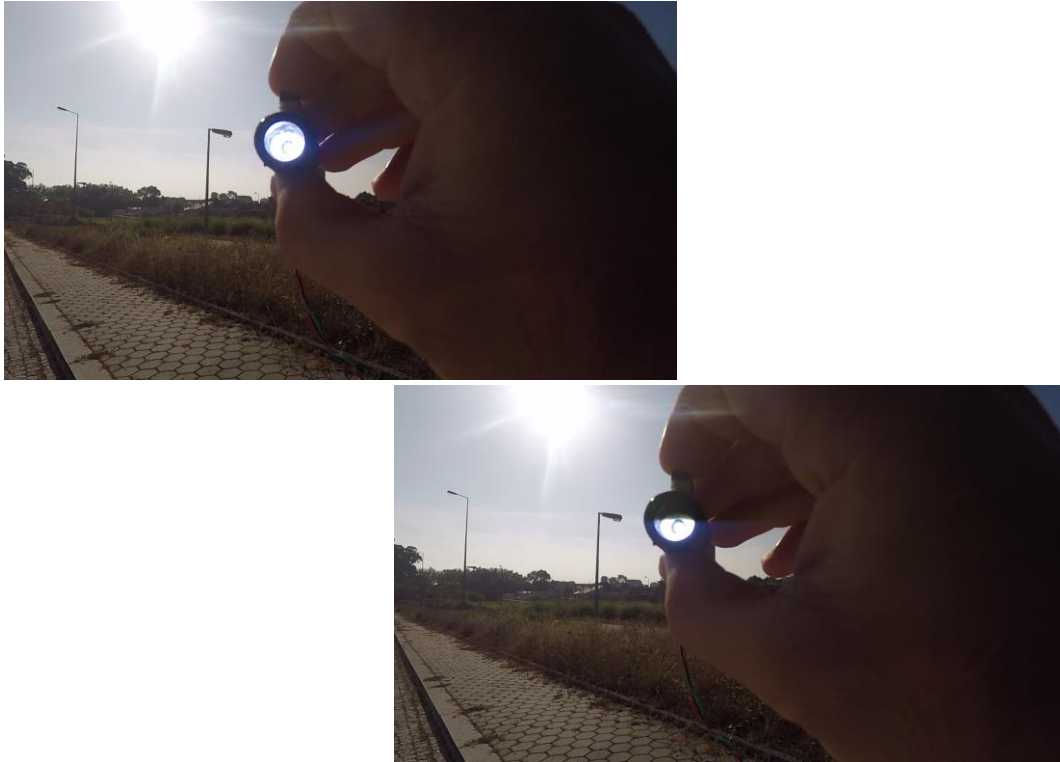


Figura 21: Utilização da lanterna LED para registar um evento de sincronização no vídeo

Findo o processo de identificação dos eventos de sincronização nas fotos, procedeu-se ao cálculo do tempo de cada *frame*. Partindo do princípio que as frames seguem uma sequência igualmente espaçada no tempo, recorreu-se a uma interpolação linear, que contempla o número de *frames* entre dois eventos de sincronização consecutivos. Na situação mais simples, precisa-se de um evento de sincronização no início do levantamento e outro no fim.

3.4.4 LEVER ARME O RUMO DA CÂMARA

Quer fossem usadas as posições do Emlid Reach ou do Trimble R6, era necessário estudar o transporte de coordenadas do centro de fase da antena para o centro de projeção da câmara.

Uma vez que este trabalho não contempla um IMU, e propositadamente, de forma a manter o tratamento de dados simples, no transporte de coordenadas não entram rotações, havendo apenas movimento horizontal e vertical.

O estudo do *lever arm* foi desenvolvido em ambiente Computer-Aided Design (CAD), conforme o diagrama da Figura 22. Para a componente planimétrica, a mais importante, partiu-se do rumo final da viatura, e com esta já parada, avaliou-se a quantidade angular entre o Trimble R6 e a câmara, cujas coordenadas das posições relativamente à viatura já eram conhecidas. Para a componente altimétrica, foi uma simples variação de altura entre centros.

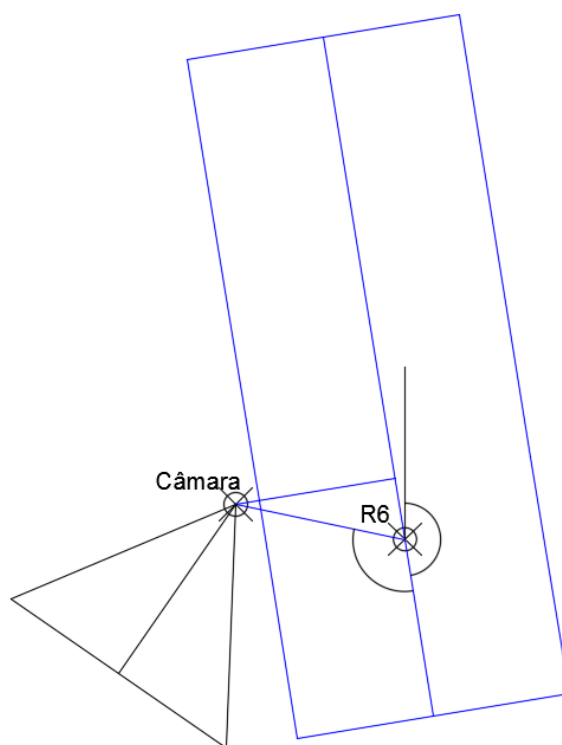


Figura 22: Análise do transporte de coordenadas entre o Trimble R6 e a câmara, e o respetivo rumo da câmara

Mais desafiante foi a estimação do rumo da câmara face à viatura. Para tal, com viatura parada e ainda com a câmara a gravar, foram coordenados vários pontos com o Trimble R6 ao longo do campo de visão da câmara (Figura 23).



Figura 23: Levantamento das coordenadas de apoio à estimação do rumo da câmara

3.4.5 SCRIPTS DESENVOLVIDOS E RESUMO DO *WORKFLOW*

Para otimizar a cadeia de produção e agilizar os testes às posições finais da câmara, foram desenvolvidas algumas rotinas em *python* e integradas em *shell script*, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Descrição das rotinas desenvolvidas em *python*

<i>frmAzLvrArm</i>	<p>Para um dado <i>input</i> de uma coordenada 3D, aplica um transporte de coordenadas e devolve uma nova coordenada 3D</p> <p>A partir dessa nova coordenada, projeta o rumo da câmara a 15 metros e devolve essa coordenada 2D também</p>
<i>lin_intrp</i>	<p>Para um dado número de <i>frame</i>, devolve o respetivo tempo por meio de uma interpolação linear, partindo de um ficheiro de referência com os números das <i>frames</i>, os respetivos tempos</p>
<i>cub_int</i>	<p>Tem um comportamento homólogo ao <i>lin_intrp</i> e, como base um ficheiro com tempos e posições 3D, devolve uma posição 3D para um respetivo tempo, com base numa interpolação cúbica</p>

Como tem sido descrito, as posições do Trimble R6 serviram de base às coordenadas finais da câmara, usando para isso as referências temporais dadas pelos tempos de sincronização do Reach.

Sabendo que cada posição do Timble R6 tem um tempo⁹ preciso, o tratamento da informação segue a seguinte sequência:

$$\mathbf{CamPos} = cub_int (frmAzLvrArm [\mathbf{R6}], lin_intrp [\mathbf{FRAMES}])$$

Onde as posições do Trimble R6 são dadas pela variável **R6** e a sequência de todas as *frames* do levantamento são dadas pela variável **FRAMES**, com o resultado final dado pela variável **CamPos**.

Portanto, primeiramente o *lever arm* foi aplicado às posições do Trimble R6 e só depois foram aplicadas as interpolações no tempo e espaço. Desta forma, foram evitados problemas derivados do cálculo de rumos sobre coordenadas interpoladas e muito próximas. Importa novamente salientar que a solução estaria mais consolidada se as posições originais do Trimble R6 fossem dadas com uma taxa superior a um segundo.

⁹ Tempo GPS o mesmo tempo usado como referência no Reach

4 RESULTADOS

4 RESULTADOS

Um vídeo numa GoPro 5 Hero Black de 1080p a 60FPS produz dados a um *bitrate* na ordem dos 30Mbps. Isto significa que 25 minutos de vídeo geram 5.6GB, resultando em mais 88000 *frames*. Para o fim da calibração dos parâmetros de orientação externos da câmara, as *frames* do vídeo têm de ser convertidas em imagem. No final, o vídeo resulta em mais de 25GB de imagens.

4.1 FRAMES POR SEGUNDO DA GOPRO

Não sendo propriamente um resultado, é um elemento importante para o estudo perceber que a taxa efetiva de *frames* por segundo desta câmara quando usada a 60 FPS ($59.940 = 60000/1001$) é, na verdade, aproximadamente 59.942 FPS. Isto significa uma diferença de cerca 1 *frame* a cada 8 minutos¹⁰. Admitindo uma velocidade de 10 m/s a 60 FPS, tem-se um erro sistemático de cerca de 17 centímetros¹¹ a cada 8 minutos, o que ao fim de 50 minutos de vídeo se traduz num erro de um metro. levando a solução para fora do *survey grade*.

Analisando os dados do levantamento efetuado, concluiu-se que havia uma diferença nos tempos das *frames* para a taxa de referência. Foi então conduzido um estudo onde foram registados cerca de 60 eventos de sincronização ao longo de 50 minutos de vídeo, mais de 113000 *frames*. Deste estudo foi possível produzir o gráfico apresentado na Figura 24, cuja regressão linear devolveu uma taxa de *frames* por segundo similar aos valores detetados no levantamento de teste. De salientar o elevado valor de correlação entre todos os eventos.

¹⁰ $[1 / (59.942\text{fps} - 59.940\text{fps})] / 60 = 8.333$ minutos

¹¹ $10(\text{m/s}) / 60(\text{fps})$

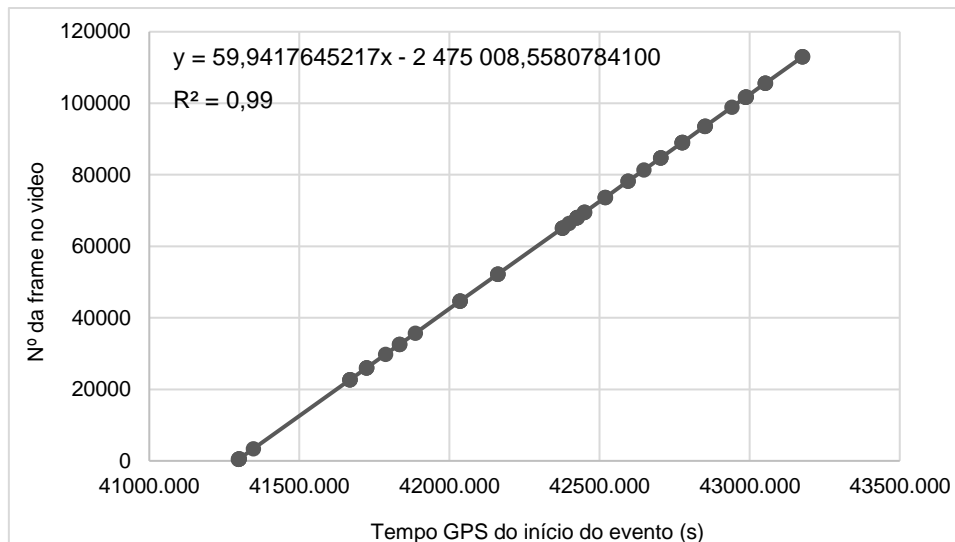


Figura 24: Gráfico relacionado o tempo com o número da *frame*

4.2 VERIFICAÇÃO DOS RUMOS CALCULADOS

Inicialmente, as expectativas eram que, com as posições da câmara e os respetivos rumos, seria possível perceber, pelo centro das imagens, se esta estaria bem posicionada, ao observar objetos no alinhamento do rumo. Para isso, procedeu-se ao desenvolvimento de uma pequena aplicação *web* (Figura 25) que permite navegar nas *frames* em função do seu número e facilmente averiguar o centro destas.

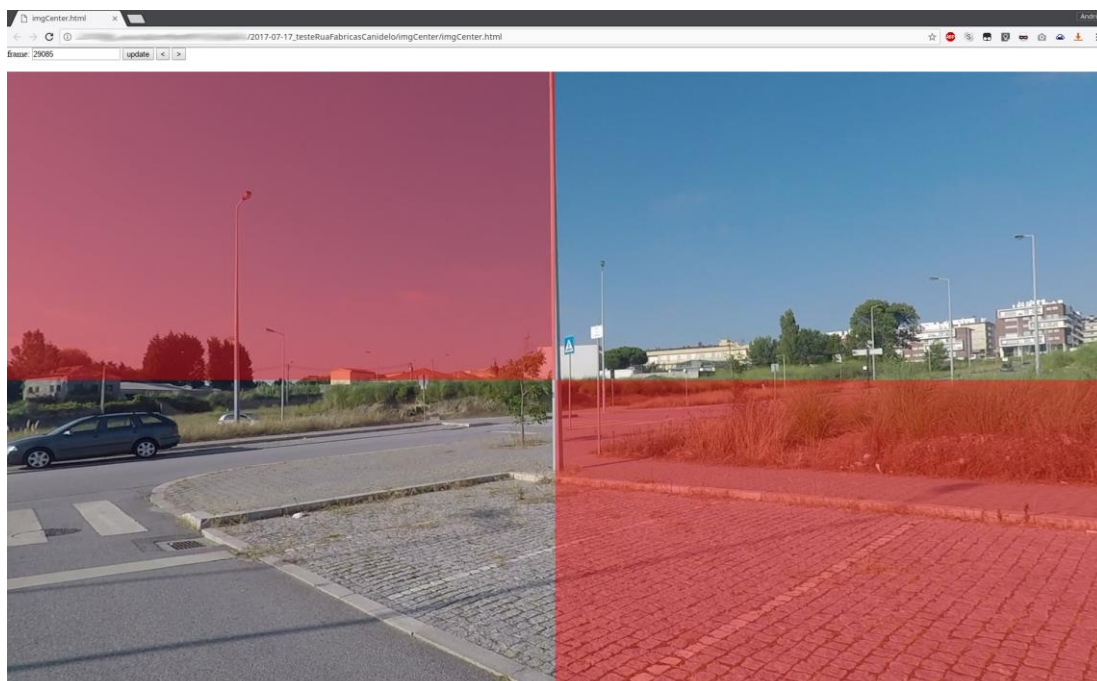


Figura 25: Aplicação *web* apresentando a *frame* número 29085

Verificando o rumo desta imagem sobre um ortofoto num software de Sistema de Informação Geográfica (SIG), Figura 26, observa-se que o cálculo deste rumo foi bem-sucedido.

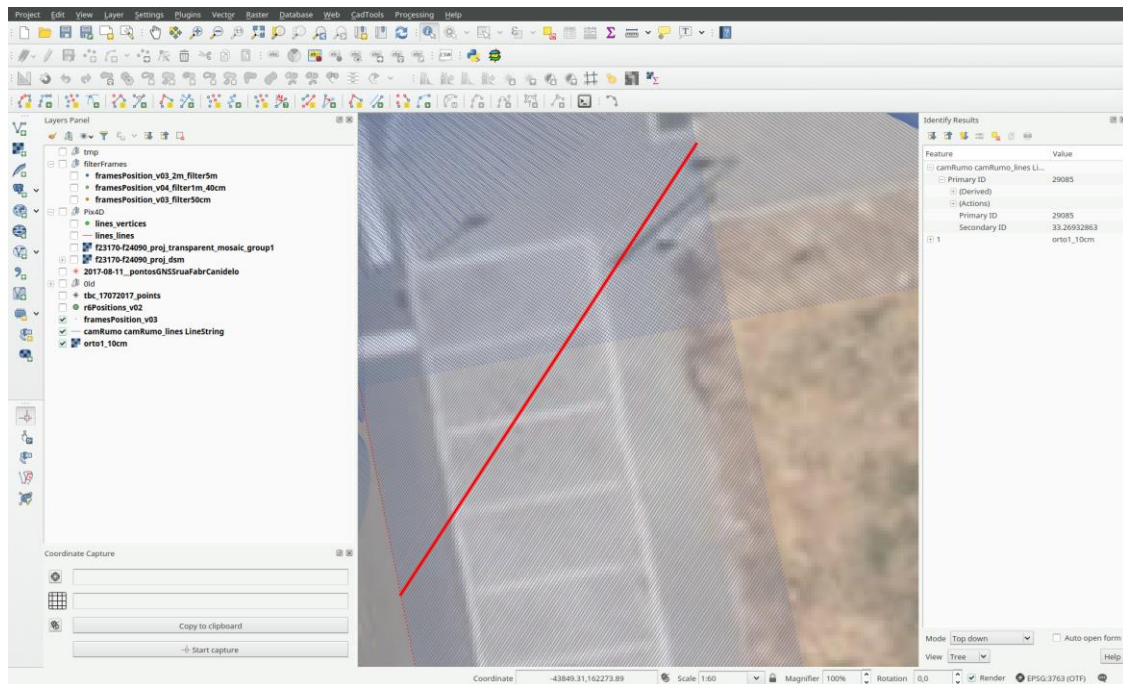


Figura 26: Verificação do rumo da *frame* número 29085 em QGis

Este comportamento foi verificado ao longo da maioria do trajeto, com a exceção de zonas de curva. Observou-se que um estabilizador de imagem de 2 eixos iria contribuir para a aquisição de imagens alinhadas verticalmente e assim possibilitar, com menor erro, cálculos fotogramétricos a Duas Dimensões (2D). Ainda se fizeram algumas verificações do desvio das imagens sobre o rumo, mas rapidamente o interesse voltou-se para resultados bem mais objetivos.

4.3 BUNDLE ADJUSTMENT COM AS IMAGENS ADQUIRIDAS

Escolheu-se um conjunto de imagens, fixando os parâmetros da câmara à exceção da orientação, e correu-se com sucesso¹² o processamento inicial, o *Bundle Adjustment*, no Pix4Dmapper, obtendo-se resultados muito satisfatórios (Figura 27).

¹² No PhotoScan da Agisoft as tentativas de *Bundle Adjustment* não foram bem sucedidas

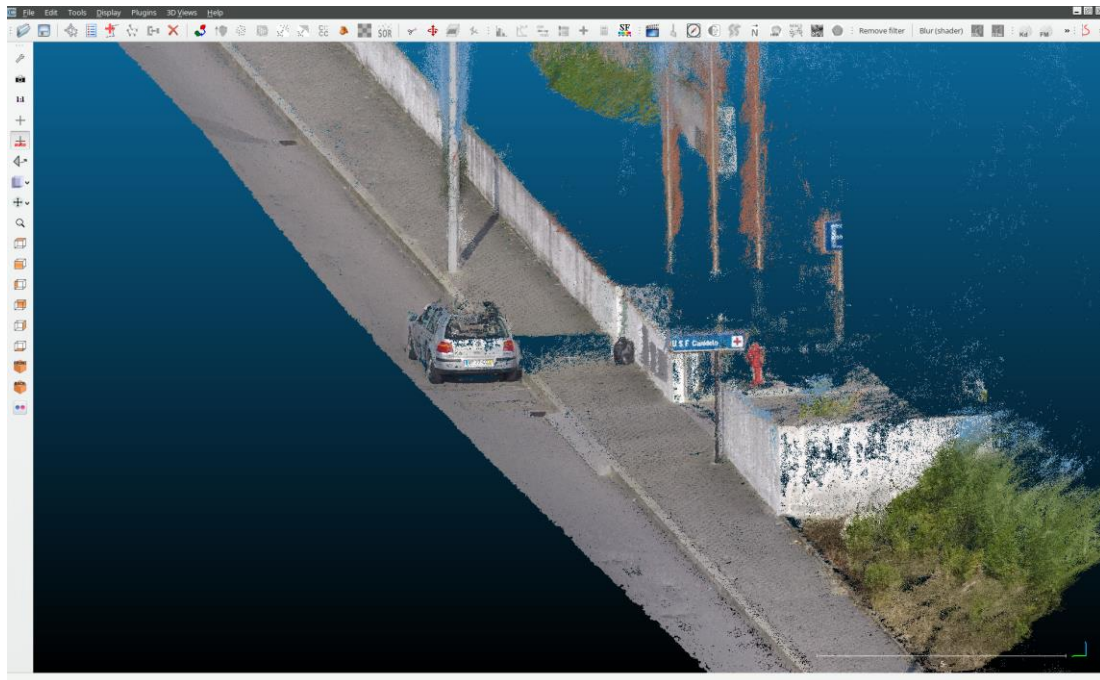


Figura 27: Nuvem de Pontos resultante da densificação do *Bundle Adjustment* visualizada no CloudCompare

Estes resultados carecem de uma análise mais cuidada. No entanto, os erros de exatidão posicional, por excesso, desta nuvem de pontos andam na ordem dos 10 centímetros em planimetria e nos 20 centímetros em altimetria.

Finalmente, ainda se desenvolveu mais uma ferramenta, novamente em *python*, para filtrar as *frames* em função da distância, uma vez que para este levantamento a 60FPS e velocidade a que a viatura se deslocou permitiu ter uma foto aproximadamente a cada 10 cm. Com esta ferramenta permitiu-se aplicar uma filtragem de distância para o movimento linear e curvilíneo, pontos verdes apresentados na Figura 28.

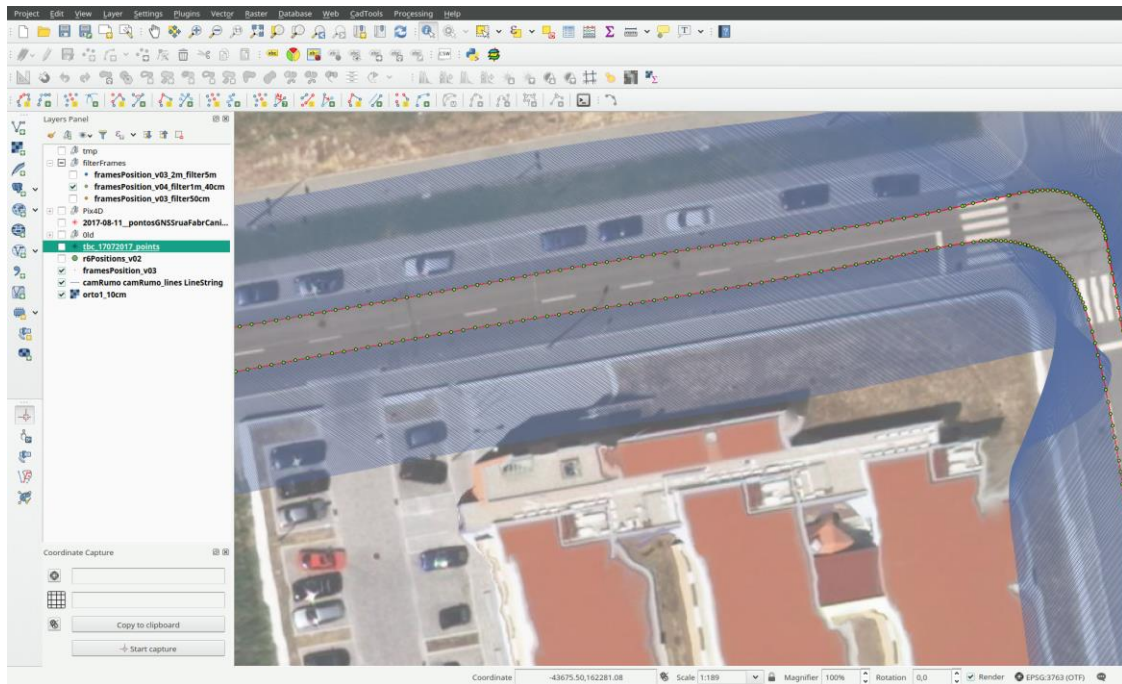


Figura 28: Zona escolhida para estudo dos resultados

A escolha desta zona do levantamento para o estudo dos resultados deveu-se a 2 fatores:

- Uma boa exposição solar, zona sem sombras, bom para o *image matching*;
- Zona com um edifício circundado por um muro, conforme a Figura 29, o que de certa forma confere uma escala, para as imagens, constante de relevância.



Figura 29: *Frame* número 23590 do levantamento, tamanho 1080p

5 CONCLUSÃO

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolvido é criada uma solução capaz de produzir imagens cujas orientações internas e externas são bem conhecidas.

A integração do *hardware* ofereceu um bom desafio, no entanto, carece de melhoramento e mais desenvolvimento. A introdução de um recetor de dupla frequência, a integração de um estabilizador de imagem para a câmara, o desenvolvimento de um meio de registar os *flashes* nas imagens automaticamente, são tudo passos que vão melhorar significativamente a solução já desenvolvida.

A nível do *software*, a abordagem é simples e merece mais sofisticação, nomeadamente, com a deteção dos flashes no vídeo, identificação de *outliers*, exportação das *frames* em função da distância, tudo de forma automática ou automaticamente assistida. A possibilidade de ser implementada uma solução de *Bundle Adjustment* específica para o *mobile mapping* neste caso, concede sistema a independência de *software* de terceiros.

Embora, não contemplada a informação de sensores inerciais, nesta fase, é imprescindível fazer uso de um IMU em ambientes com uma cobertura deficiente/ruído na componente GNSS. Neste momento, já existem soluções integradas GNSS/INS, o caso do *Reach*, e por isso, sendo integrado facilita a obtenção dos dados. Importante salientar que a adição de um IMU traz muita complexidade à solução, mas não deixa de ser um ponto-chave quando se pretende passar do *mapping* para o *survey grade*.

A nível de utilização, este equipamento pode ser usado sem que seja necessária grande formação sobre a operacionalização do mesmo. Resume-se a ligar um recetor GNSS em modo de aquisição e dados, a colocar a câmara de vídeo modo de gravação, e esporadicamente fazer *flashes* luminosos, sendo que um no início e um no fim do levantamento são suficientes na maioria dos casos.

O presente sistema implementado abre portas a mais investigação, mas também ao desenvolvimento de um produto para fins profissionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balletti, C., F. Guerra, V. Tsioukas, P. Vernier (2014). Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes, *Sensors* 14, pp. 17471-17490.

Bastos, L., P. Tomé, T. Cunha, S. Cunha (1999). A GPS/INS System for Positioning and Orientation of Airborne Sensors: Results from flight tests in Portugal. Comunicação apresentada no workshop DIRECT VERSUS INDIRECT METHODS OF SENSOR ORIENTATION of ISPRS Commission III, Barcelona (1999), Espanha.

Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, L. Van Gool (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding* 110 (2008), pp. 346-359.

Brown, D.C. (1972). Calibration of close-range cameras, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 19(5) (1972) Unbound paper, 26 pages, ISP Congress, Ottawa.

El-Sheimy, N. (1996). The development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications, Tese de Doutoramento, Universidade de Calgary (1996), Canadá.

Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision* 60(2) (2004), pp. 91-110.

Madeira, S. (2007). Sistema Móvel de Levantamento com Integração em SIG, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2007), Portugal.

Mur-Artal, R., J. D. Tardós (2017). ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras, *IEEE Transactions on Robotics* 33(5) (2017), pp. 1255-1262.

Neuhold, G., T. Ollmann, S. Rota Bulò, P. Kotschieder (2017). The Mapillary Vistas Dataset for Semantic Understanding of Street Scenes, *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (2017), pp. 4990-4999.

Rublee, E., V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski (2011). ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (2011), pp. 2564-2571.